

54996

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer direkteinspritzenden Diesel-Brennkraftmaschine, welche in einem ersten, der niedrigen bis mittleren Teillast zugeordneten Betriebsbereich so betrieben wird, dass die Verbrennung des Kraftstoffes bei einer lokalen Temperatur unterhalb der NO_x-Bildungstemperatur und mit einem lokalen Luftverhältnis oberhalb der Rußbildungsgrenze erfolgt, wobei die Kraftstoffeinspritzung in einem Bereich zwischen 50° bis 5° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt der Kompressionsphase begonnen wird und Abgas rückgeführt wird, wobei die Abgasrückführrate etwa 50% bis 70% beträgt. Weiters betrifft die Erfindung eine Brennkraftmaschine zur Durchführung des Verfahrens.

Die wichtigsten Bestimmungsstücke für den Verbrennungsablauf in einer Brennkraftmaschine mit innerer Verbrennung sind die Phasenlage des Verbrennungsablaufes bzw. des Verbrennungsbeginnes, die maximale Anstiegsgeschwindigkeit des Zylinderdruckes, sowie der Spitzendruck.

Bei einer Brennkraftmaschine, bei der die Verbrennung im Wesentlichen durch Selbstzündung einer direkt eingespritzten Kraftstoffmenge erfolgt, werden die Bestimmungsstücke maßgeblich durch den Einspritzzeitpunkt, durch die Ladungszusammensetzung und durch den Zündverzug festgelegt. Diese Parameter werden ihrerseits durch eine große Anzahl von Einflussgrößen bestimmt, wie zum Beispiel Drehzahl, Kraftstoffmenge, Ansaugtemperatur, Ladedruck, effektives Kompressionsverhältnis, Inertgasgehalt der Zylinderladung und Bauteiltemperatur.

Strengere gesetzliche Rahmenbedingungen bewirken, dass bei der Konzeption von Brennverfahren immer wieder neue Wege eingeschlagen werden müssen, um bei Dieselmotoren den Ausstoß an Rußpartikeln und an NO_x-Emissionen zu verringern.

Es ist bekannt NO_x- und Rußemissionen im Abgas zu verringern, indem durch Vorverlegen des Einspritzzeitpunktes der Zündverzug vergrößert wird, so dass die Verbrennung durch Selbstzündung eines mageren Kraftstoff-Luftgemisches erfolgt. Eine mögliche Variante wird hier als HCLI-Verfahren (Homogenous Charge Late Injection) bezeichnet. Wenn eine derartige Gemischverbrennung durchgeführt wird, erfolgt die Kraftstoffeinspritzung somit genügend weit vor dem oberen Totpunkt der Kompressionsphase, wodurch ein weitgehend homogenes Kraftstoff-Luftgemisch entsteht. Durch Abgasrückführung kann erreicht wer-

- 2 -

den, dass die Verbrennungstemperatur unterhalb der für NO_x-Entstehung erforderlichen Mindesttemperatur bleibt. Da die Homogenisierung von Kraftstoff und Luft allerdings zeitabhängig ist, ist die Realisierung dieses Verfahrens drehzahl- und lastabhängig eingeschränkt, da bei unzureichender Homogenisierung der Partikelaustritt zunimmt.

Die US 6,338,245 B1 beschreibt eine nach dem HCLI-Verfahren arbeitende Diesel-Brennkraftmaschine, bei der Verbrennungstemperatur und Zündverzögerung so eingestellt werden, dass im unteren und mittleren Teillastbereich die Verbrennungstemperatur unter der NO_x-Bildungstemperatur und das Luftverhältnis oberhalb des für die Rußbildung maßgeblichen Wertes liegt. Die Verbrennungstemperatur wird dabei durch Verändern der Abgasrückführrate, der Zündverzögerung durch den Kraftstoffeinspritzzeitpunkt gesteuert. Bei mittlerer und hoher Last wird die Verbrennungstemperatur so weit abgesenkt, dass sowohl NO_x- als auch Rußbildung vermieden wird. Nachteilig ist, dass insbesondere im mittleren Teillastbereich ein niedriges Luftverhältnis kombiniert mit niedrigen Verbrennungstemperaturen auftritt und daher ein schlechter Wirkungsgrad in Kauf genommen werden muss.

Die US 6,158,413 A beschreibt eine direkteinspritzende Diesel-Brennkraftmaschine, bei der die Kraftstoffeinspritzung nicht vor dem oberen Totpunkt der Kompression angesetzt ist, und bei der die Sauerstoffkonzentration im Brennraum durch Abgasrückführung vermindert wird. Dieses Betriebsverfahren wird hier auch als HPLI-Verfahren (Highly Premixed Late Injection) bezeichnet. Wegen des - verglichen mit einer konventionellen Einspritzung vor dem oberen Totpunkt - nach dem oberen Totpunkt sinkenden Temperaturniveaus und der gegenüber konventioneller Betriebsweise erhöhten Menge rückgeführten Abgases ist der Zündverzögerung länger als bei der sogenannten Diffusionsverbrennung. Das durch die Abgasrückführrate gesteuerte niedrige Temperaturniveau bewirkt, dass die Verbrennungstemperatur unter dem für die NO_x-Bildung maßgeblichen Wert bleibt. Durch den durch den späteren Einspritzzeitpunkt bewirkten großen Zündverzögerung wird eine gute Gemischbildung erreicht, wodurch bei der Verbrennung des Gemisches der lokale Sauerstoffmangel deutlich reduziert wird, wodurch die Partikelentstehung verringert wird. Die Spätverschiebung des Brennverlaufes bewirkt eine Absenkung der Maximaltemperatur, führt aber gleichzeitig zu einer Anhebung der mittleren Temperatur bei einem gegebenen späten Kurbelwinkel, was den Rußabbrand verstärkt. Die Verschiebung der Verbrennung in den Expansionstakt führt darüber hinaus im Zusammenwirken mit der hohen Abgasrückführrate trotz der wegen des langen Zündverzögerung größeren vorgemischten Kraftstoffmenge und folglich höheren maximalen Brennrate zu einer das zulässige

- 3 -

Maß nicht übersteigenden Druckanstiegsrate im Zylinder. Nachteilig ist der schlechte Wirkungsgrad im unteren Teillastbereich.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Betreiben einer Brennkraftmaschine zu entwickeln, mit welchem sich einerseits vom unteren Teillastbereich bis zum Volllastbereich minimale Stickoxid- und Rußemissionen, und andererseits ein hoher Wirkungsgrad erreichen lässt.

Erfindungsgemäß wird dies dadurch erreicht, dass in einem zweiten, der mittleren Teillast zugeordneten Betriebsbereich die Kraftstoffeinspritzung in einem Bereich zwischen etwa 2° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt bis etwa 20° Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt, vorzugsweise in einem Bereich zwischen etwa 2° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt bis etwa 10° Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt, begonnen wird.

Im ersten Betriebsbereich arbeitet die Brennkraftmaschine nach dem HCLI-Verfahren, bei dem der Einspritzzeitpunkt relativ früh im Kompressionstakt, also im Bereich von etwa 50° bis 5° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt, liegt. Die Einspritzung des Kraftstoffes erfolgt im ersten Betriebsbereich vorzugsweise in einem Bereich zwischen 400 und 1000 bar. Der Verbrennungsschwerpunkt liegt zwischen 10° vor bis 10° Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt, wodurch sich ein sehr hoher Wirkungsgrad erreichen lässt. Durch die relativ hohe Abgasrückführrate zwischen 50 und 70% liegt die lokale Verbrennungstemperatur unter der NOx-Bildungstemperatur. Das lokale Luftverhältnis bleibt somit oberhalb der Rußbildungsgrenze. Die Abgasrückführung kann durch externe oder interne Abgasrückführung oder durch eine Kombination von externer und interner Abgasrückführung mit variabler Ventilsteuerung erreicht werden.

Im zweiten Betriebsbereich wird die Brennkraftmaschine nach dem HPLI-Verfahren betrieben. Dabei liegt der Hauptanteil der Einspritzphase nach dem oberen Totpunkt der Kompression. Wegen des - verglichen mit der konventionellen Einspritzung vor dem oberen Totpunkt - nach dem oberen Totpunkt sinkenden Temperaturniveaus und der gegenüber konventioneller Betriebsweise erhöhten Menge rückgeführten Abgases zwischen 20% und 40% ist der Zündverzug hier länger. Gegebenenfalls können zur Verlängerung des Zündverzuges auch weitere Mittel, wie eine Absenkung des effektiven Kompressionsverhältnisses und/oder der Einlasstemperatur, sowie zur Verkürzung der Einspritzdauer eine Erhöhung des Einspritzdrucks und/oder eine Vergrößerung der Spritzlochquerschnitte der Einspritzdüse, herangezogen werden. Die Einspritzdauer wird derart gestaltet, dass das Einspritzende vor dem Verbrennungsbeginn liegt. In diesem Fall kann die Rußemission auf sehr niedrigem Niveau gehalten werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass dabei das gleichzeitige Auftreten von flüssigem Kraftstoff im

- 4 -

Kraftstoffstrahl einerseits und der den Strahl konventionellerweise umhüllenden Flamme andererseits, vermieden wird, wodurch auch die sonst zur Rußbildung führenden, unter Luftmangel ablaufenden, Oxidationsreaktionen in Strahlnähe unterbunden werden. Für das Verbrennungsverfahren im zweiten Betriebsbereich werden Einspritzdrücke von mindestens 1000 bar benötigt. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass sehr niedrige NO_x- und Partikelemissionen entstehen und dass eine relativ hohe Abgastemperatur erreicht wird, welche wiederum von Vorteil ist bei der Regeneration von Partikel-Abgasnachbehandlungseinrichtungen.

In weiterer Ausführung der Erfindung ist vorgesehen, dass in einem dritten, der oberen Teillast und der Vollast zugeordneten Betriebsbereich der Hauptanteil der Kraftstoffeinspritzung in einem Bereich zwischen 10° vor bis 10° Kurbelwinkel nach dem oberen Totpunkt erfolgt, wobei vorzugsweise vorgesehen ist, dass im dritten Betriebsbereich eine Mehrfacheinspritzung durchgeführt wird. Die Abgasrückführrate beträgt im dritten Betriebsbereich bis zu 30%, vorzugsweise etwa 10 bis 20%. Dadurch lassen sich einerseits eine hohe Leistung, andererseits geringe NO_x-Emissionen und geringe Partikelemissionen erreichen.

Die Brennkraftmaschine wird im ersten, zweiten und/oder im dritten Betriebsbereich mit einem globalen Luftverhältnis von etwa 1,0 bis 2,0 betrieben.

Vorteilhafterweise ist vorgesehen, dass die Abgasrückführung extern und/oder intern durchgeführt wird und der Drall zumindest in einem Bereich, vorzugsweise in allen drei Bereichen, variabel ist. Günstige Abgaswerte bei geringem Kraftstoffverbrauch können mit Drallzahlen zwischen 0 und 5 erreicht werden.

Weiters ist es von Vorteil, wenn das geometrische Kompressionsverhältnis variabel ist. Das geometrische Kompressionsverhältnis ist dabei in einem Bereich zwischen 15 und 19 veränderbar. Ein hohes Kompressionsverhältnis ist für die Phase des Kaltstarts von Vorteil. Eine Reduzierung des Kompressionsverhältnis während des Lastanstieges erhöht sowohl im ersten, als auch im zweiten Betriebsbereich die maximal erreichbare Last und verringert die Rußemissionen durch längeren Zündverzug.

Dabei kann vorgesehen sein, dass das effektive Kompressionsverhältnis durch den Schließzeitpunkt zumindest eines Einlassventiles verändert wird. Durch Verzögerung des Einlassschlusses oder durch sehr frühen Einlassschluss kann das effektive Kompressionsverhältnis reduziert werden, wodurch die für niedrige NO_x-Raten und Rußemissionen erforderliche Abgasrückführrate vermindert werden kann. Dabei können sowohl der Zeitpunkt des Einlassöffnens, als auch der

- 5 -

Zeitpunkt des Einlassschließens oder nur der Einlassschließzeitpunkt verschoben werden.

In weiterer Ausführung der Erfindung ist vorgesehen, dass der Wechsel vom ersten zum zweiten Betriebsbereich bzw. vom zweiten zum ersten Betriebsbereich durch Reduktion bzw. Erhöhung der Abgasrückführrate eingeleitet wird. Alternativ dazu ist es auch möglich, dass der Übergang vom ersten zum zweiten Motorbetriebsbereich bzw. umgekehrt durch Reduktion der internen oder externen Abgasrückführrate und durch Verzögern des Einspritzbeginnes bzw. durch Erhöhen der Abgasrückführrate und durch Vorverlegung des Einspritzbeginnes eingeleitet wird.

Vorzugsweise ist dabei vorgesehen, dass die Reduktion der Abgasrückführrate beim Übergang zwischen ersten und zweiten Motorbetriebsbereich durch Steuerung des Öffnungs- und/oder Schließzeitpunktes des Einlassventiles erfolgt.

Der effektive Mitteldruck beträgt vorzugsweise im ersten Betriebsbereich zwischen etwa 0 und 6 bar, besonders vorzugsweise bis 5,5 bar, im zweiten Betriebsbereich zwischen etwa 3,5 bis 8 bar, besonders vorzugsweise zwischen 4 und 7 bar, und im dritten Betriebsbereich mindestens etwa 5,5 bar, besonders vorzugsweise mindestens etwa 6 bar.

Zur Durchführung des Verfahrens ist eine direkteinspritzende Diesel-Brennkraftmaschine mit zumindest einem Zylinder für einen hin- und hergehenden Kolben erforderlich, bei der der Beginn der Kraftstoffeinspritzung zumindest zwischen 50° Kurbelwinkel vor dem oberen Totpunkt und 20° nach dem oberen Totpunkt, vorzugsweise bis 50° nach dem oberen Totpunkt, und die Abgasrückführrate zwischen etwa 0 bis 70% variierbar ist. Weiterhin ist vorgesehen, dass der Kraftstoffeinspritzdruck zumindest zwischen einem ersten und einem zweiten Druckniveau variierbar ist, wobei vorzugsweise das erste Druckniveau einen Bereich bis etwa 1000 bar und das zweite Druckniveau einen Bereich von mindestens 1000 bar abdeckt, sowie dass eine Einrichtung zur Veränderung des Drallniveaus vorgesehen sein kann.

Weiters ist es von Vorteil, wenn Einlassöffnungszeitpunkt und Einlassschließzeitpunkt variierbar sind. Um dies zu realisieren, ist es vorteilhaft, wenn mittels einer Phasenschiebereinrichtung die Steuerzeiten des Einlassventiles oder auch des Auslassventiles verschiebbar sind. Sehr vorteilhaft ist es dabei, wenn zumindest ein Einlassventil in der Auslassphase aktivierbar ist. Zusätzlich oder alternativ dazu kann vorgesehen sein, dass zumindest ein Auslassventil in der Einlassphase aktivierbar ist.

Die Erfindung wird im Folgenden anhand der Figuren näher erläutert. Es zeigen

- 6 -

- Fig. 1 eine Brennkraftmaschine zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, in einer schematischen Ansicht,
- Fig. 2 ein Diagramm, in welchem das lokale Luftverhältnis λ_L über der lokalen Temperatur T_L aufgetragen ist,
- Fig. 3 ein Last-Drehzahldiagramm,
- Fig. 4 bis 7 Ventilhubdiagramme mit verschiedenen variablen Steuerzeiten,
- Fig. 8 ein Einspritzzeit-EGR-Rate-Lastdiagramm,
- Fig. 9 ein Messdiagramm für den ersten Betriebsbereich A und
- Fig. 10 ein Messdiagramm für den zweiten Betriebsbereich B.

Fig. 1 zeigt eine Brennkraftmaschine 1 mit einem Einlasssammler 2 und einem Auslasssammler 3. Die Brennkraftmaschine 1 wird über einen Abgasturbolader 4, welche eine abgasbetriebene Turbine 5 und einen durch die Turbine 5 angetriebenen Verdichter 6 aufweist, aufgeladen. Stromaufwärts des Verdichters 6 ist auf der Einlassseite ein Ladeluftkühler 7 angeordnet.

Weiters ist ein Hochdruck-Abgasrückführsystem 8 mit einer ersten Abgasrückführleitung 9 zwischen dem Abgasstrang 10 und der Einlassleitung 11 vorgesehen. Das Abgasrückführsystem 8 weist einen Abgasrückführkühler 12 und ein Abgasrückführventil 13 auf. Abhängig von der Druckdifferenz zwischen den Auslassstrang 10 und der Einlassleitung 11 kann in der ersten Abgasrückführleitung 9 auch eine Abgaspumpe 14 vorgesehen sein, um die Abgasrückführrate zu steuern bzw. zu erhöhen.

Neben diesem Hochdruck-Abgasrückführsystem 8 ist ein Niederdruck-Abgasrückführsystem 15 stromabwärts der Turbine 5 und stromaufwärts des Verdichters 6 vorgesehen, wobei in der Abgasleitung 16 stromabwärts eines Partikelfilters 17 eine zweite Abgasrückführleitung 18 abzweigt und stromaufwärts des Verdichters 6 in die Ansaugleitung 19 einmündet. In der zweiten Abgasrückführleitung 18 ist weiters ein Abgasrückführkühler 20 und ein Abgasrückführventil 21 angeordnet. Zur Steuerung der Abgasrückführrate ist in der Abgasleitung 16 stromabwärts der Abzweigung ein Abgasventil 22 angeordnet.

Stromaufwärts der Abzweigung der ersten Abgasrückführleitung 9 ist im Abgasstrang 10 ein Oxidationskatalysator 23 angeordnet, welcher HC, CO und flüchtige Teile der Partikelemissionen entfernt. Ein Nebeneffekt ist, dass die Abgastemperatur dabei erhöht wird und somit zusätzliche Energie der Turbine 5 zugeführt wird. Prinzipiell kann dabei der Oxidationskatalysators 23 auch stromabwärts der

- 7 -

Abzweigung der Abgasrückführleitung angeordnet sein. Die in Fig. 1 gezeigte Anordnung mit der Abzweigung stromabwärts des Oxidationskatalysators 23 hat den Vorteil, dass der Abgaskühler 12 einer geringeren Verschmutzung ausgesetzt ist, aber den Nachteil, dass aufgrund der höheren Abgastemperaturen eine höhere Kühlleistung durch den Abgasrückführkühler 12 notwendig wird.

Pro Zylinder 24 weist die Brennkraftmaschine 1 zumindest ein direkt Diesel-Kraftstoff in den Brennraum einspritzendes Einspritzventil 25 auf, welches in der Lage ist, mehrere Einspritzungen pro Arbeitszyklus vorzunehmen und deren jeweiliger Einspritzbeginn in einem Bereich zwischen 50° Kurbelwinkel CA vor dem oberen Totpunkt TDC bis $+50^\circ$ Kurbelwinkel CA nach dem oberen Totpunkt TDC verändert werden kann. Der maximale Einspritzdruck sollte dabei mindestens 1000 bar betragen.

Die Brennraumform und die Kraftstoffeinspritzkonfiguration sind für eine konventionelle Vollast-Diesel-Verbrennung auszulegen.

Fig. 2 zeigt ein Diagramm, in welchem das lokale Luftverhältnis λ_L über der lokalen Verbrennungstemperatur T_L aufgetragen ist. In dem mit SOOT bezeichneten Bereich tritt starke Rußbildung auf, mit NOx ist der Bereich starker Stickoxidbildung bezeichnet. Mit A, B, C sind erster, zweiter und dritter Betriebsbereich des hier beschriebenen Verfahrens eingetragen.

Der erste Betriebsbereich A ist dabei dem unteren bis mittleren Teillastbereich L_L , der zweite Motorbetriebsbereich B dem mittleren bis oberen Teillastbereich L_M und der dritte Motorbetriebsbereich C dem Hochlast- und Vollastbereich L_H zugeordnet, wie aus dem in Fig. 3 dargestellten Last L -Drehzahl n -Diagramm zu entnehmen ist.

Im ersten Betriebsbereich A, welcher auch als HCLI-Bereich bezeichnet wird (Homogenous Charge Late Injection) liegt der Beginn der Einspritzung relativ früh im Kompressionstakt, also etwa bei 50° bis 5° Kurbelwinkel CA vor dem oberen Totpunkt TDC nach dem Kompressionstakt, wodurch ein langer Zündverzug zur Ausbildung eines teilhomogenen Gemisches für eine vorgemischte Verbrennung zur Verfügung steht. Durch die ausgeprägte Vormischung und Verdünnung können extrem niedrige Ruß- und NOx-Emissionswerte erreicht werden. Wie aus Fig. 2 hervorgeht, liegt der erste Betriebsbereich A deutlich über der für die Rußentstehung maßgeblichen Grenze für das lokale Luftverhältnis λ_{LS} . Durch eine hohe Abgasrückführrate EGR zwischen 50% bis 70% wird erreicht, dass die lokale Verbrennungstemperatur T_L stets unter der minimalen Stickoxidbildungstemperatur T_{NOx} bleibt. Die Einspritzung erfolgt bei einem Druck zwischen 400 und 1000 bar. Der lange Zündverzug bewirkt, dass die Verbrennungsphase in die

- 8 -

wirkungsgradoptimale Lage um den oberen Totpunkt TDC geschoben wird. Der Verbrennungsschwerpunkt liegt in einem Bereich zwischen -10° bis 10° Kurbelwinkel CA nach dem oberen Totpunkt TDC, wodurch ein hoher Wirkungsgrad erreicht werden kann. Die hohe Abgasrückführrate EGR, welche für den ersten Betriebsbereich A erforderlich ist, kann entweder durch externe Abgasrückführung alleine, oder durch Kombination externer mit interner Abgasrückführung durch variable Ventilsteuerung erzielt werden.

Im zweiten Betriebsbereich B wird die Brennkraftmaschine nach dem sogenannten HPLI-Verfahren (Highly Premixed Late Injection) betrieben. Dabei liegt der Hauptanteil der Einspritzphase nach dem oberen Totpunkt TDC. Im zweiten Betriebsbereich B wird die Brennkraftmaschine mit einer Abgasrückführrate zwischen 20 bis 40% betrieben, wobei der Beginn der Einspritzung in einem Bereich zwischen 2° Kurbelwinkel CA vor dem oberen Totpunkt bis 20° Kurbelwinkel CA nach dem oberen Totpunkt liegt. Durch die vollständige Trennung des Endes der Einspritzung und des Beginnes der Verbrennung wird eine teilweise Homogenisierung des Gemisches mit vorgemischter Verbrennung erreicht. Wegen des verglichen mit der konventionellen Einspritzung vor dem oberen Totpunkt sinkenden Temperaturniveaus und der gegenüber konventioneller Betriebsweise erhöhten Menge rückgeführten Abgase ist der Zündverzug länger. Zur Verlängerung des Zündverzuges können auch andere Mittel, wie eine Absenkung des effektiven Kompressionsverhältnisses ϵ und/oder der Einlasstemperatur sowie zur Verkürzung der Einspritzdauer eine Erhöhung des Einspritzdruckes und/oder eine Vergrößerung der Spritzlochquerschnitte der Einspritzdüse herangezogen werden. Die kurze Einspritzdauer ist erforderlich, damit das Einspritzende noch vor dem Verbrennungsbeginn liegt. In diesem Fall kann die Rußemission auf sehr niedrigem Niveau gehalten werden. Dies kann dadurch erklärt werden, dass dabei das gleichzeitige Auftreten von flüssigem Kraftstoff im Kraftstoffstrahl und der den Strahl konventionellerweise umhüllenden Flamme vermieden wird, wodurch auch die sonst zur Rußbildung führenden, unter Luftmangel ablaufenden Oxidationsreaktionen in Strahlnähe unterbunden werden. Die späte Lage des Einspritzzeitpunktes führt zusammen mit dem relativ langen Zündverzug zu einer Spätverlagerung des gesamten Verbrennungsablaufes, wodurch auch der Zylinderdruckverlauf nach spät verschoben und die Maximaltemperatur abgesenkt wird, was zu einer niedrigen NOx-Emission führt.

Die Spätverschiebung des Brennverlaufes bewirkt eine Absenkung der Maximaltemperatur, führt aber gleichzeitig zu einer Anhebung der Temperatur bei einem gegebenen späteren Kurbelwinkel CA, was den Rußabbbrand wiederum verstärkt.

Die Verschiebung der Verbrennung in den Expansionstakt führt darüber hinaus wieder im Zusammenwirken mit der hohen Abgasrückführrate EGR trotz der we-

- 9 -

gen des langen Zündverzugs größeren vorgemischten Kraftstoffmenge und folglich höheren maximalen Brennrate zu einer das zulässige Maß nicht übersteigenden Druckanstiegsrate in Zylinder. Die hohe maximale Brennrate, die zu einem hohen Gleichraumgrad führt, ist in der Lage, den Wirkungsgradverlust durch Spätverlagerung der Verbrennungsphase zum Teil auszugleichen. Zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades sollte der Verbrennungsschwerpunkt möglichst nahe am oberen Totpunkt TDC sein.

Der Vorteil des im zweiten Betriebsbereich B verwendenden HPLI-Verfahrens ist, dass sehr geringe NOx- und Partikelemissionen entstehen und dass eine hohe Abgastemperatur erreicht werden kann, welche für die Regeneration eines Partikelfilters von Vorteil ist. Wie aus der Fig. 2 hervorgeht, liegt die lokale Verbrennungstemperatur T_L im zweiten Betriebsbereich B zu einem kleinen Teil über der unteren NOx-Bildungstemperatur T_{NOx} . Das lokale Luftverhältnis λ_L liegt dabei großteils über der Rußbildungsgrenze λ_{LS} . Im zweiten Betriebsbereich B wird zwar Ruß zu Beginn des Verbrennungsprozesses gebildet, durch die starken Turbulenzen zu Folge der Hochdruckeinspritzung und durch hohe Temperaturen ist der Ruß aber gegen Ende des Verbrennungsprozesses oxidiert, wodurch insgesamt sehr geringe Rußemissionen entstehen.

Im dritten Betriebsbereich C wird die Brennkraftmaschine konventionell mit Abgasrückführaten EGR zwischen 0 bis 30% betrieben, wobei Mehrfacheinspritzungen möglich sind. Dadurch kann eine vorgemischte und eine Diffusionsverbrennung durchgeführt werden. Für die Abgasrückführung kann auch eine Kombination aus externer und interner Abgasrückführung verwendet werden.

Zu Vergleichszwecken ist in Fig. 2 der Betriebsbereich D punktiert eingezeichnet. Dieser Betriebsbereich D wird beispielsweise in der US 6,338,245 B1 im mittleren bis hohen Teillastbereich gefahren. Dies hat aber den Nachteil, dass infolge niedriger Temperaturen der Wirkungsgrad schlecht ist. Beim vorliegenden erfindungsgemäßen Verfahren kann dieser Bereich generell vermieden werden.

Optionell kann im ersten, zweiten und/oder dritten Betriebsbereich A, B, C auch ein Drall im Brennraum generiert werden. Die Drallbildung ist von Vorteil, um die Rußbildung weiter zu verringern. Drall und hoher Wirkungsgrad müssen dabei aufeinander abgestimmt werden.

Besonders vorteilhaft ist es, wenn sich bei der Brennkraftmaschine 1 die Ventilsteuerzeiten variabel verstellen lassen. Dadurch kann genau und schnell die Abgasrückführate EGR zwischen den Betriebsbereichen A, B, C bei Laständerungen gestellt werden. Durch Kombination von externer und interner Abgasrückführung ist eine besonders schnelle und genaue Steuerung der Abgasrückführ-

- 10 -

rate EGR möglich. Schließlich kann mittels variabler Ventilsteuerung auch eine Regelung des effektiven Kompressionsverhältnisses ϵ erfolgen, wodurch sich mit verringerter Abgasrückführrate EGR niedrigere Stickoxid- und Rußemissionen erreichen lassen.

Fig. 4 zeigt ein Ventilerhebungsdiagramm, bei dem die Ventilerhebungen l_v zumindest eines Auslassventiles A und zumindest eines Einlassventiles E über dem Kurbelwinkel CA aufgetragen sind. Durch Verschiebung der Einlassventilkurve E nach spät, beispielsweise mit einem Phasenschieber, können das effektive Kompressionsverhältnis ϵ und die erforderliche Abgasrückführrate EGR reduziert werden. Dies kann in allen drei Betriebsbereichen A, B und C erfolgen. Mit E_0 bzw. E_c sind Öffnungs- und Schließzeitpunkt des Einlassventiles bezeichnet. Mit E_{0s} und E_{oc} sind Öffnungsbeginn und Schließzeitpunkt der verschobenen Einlassventilerhebungskurve E_s angedeutet.

Alternativ dazu kann lediglich auch nur die Schließflanke der Einlassventilerhebungskurve E verändert werden, wodurch der Schließzeitpunkt früher oder später liegt, wie durch die Linien E_s' und E_s'' in Fig. 5 angedeutet ist. Es lässt sich im Wesentlichen der gleiche Effekt erzielen, wie durch Verschiebung der gesamten Ventilerhebungskurve (Fig. 4).

Interne Abgasrückführung kann bewirkt werden durch erneutes Öffnen des Auslassventils während des Einlasshubes, wie die Linie A' in Fig. 6 zeigt, oder durch erneutes Öffnen des Einlassventiles während des Auslasshubes, siehe Linie E' in Fig. 7. Dadurch kann eine schnelle Steuerung der Abgasrückführrate EGR in allen Betriebsbereichen A, B, C bewirkt werden. Es ist möglich, den Übergang zwischen dem zweiten Betriebsbereich B mit 20% bis 40%iger Abgasrückführrate EGR zum ersten Betriebsbereich A mit 50 bis 70%iger Abgasrückführrate EGR nur durch interne Abgasrückführung und durch Vorverlegen des Beginnes α_1 der Kraftstoffeinspritzung I durchzuführen. Der entgegengesetzte Wechsel vom ersten Betriebsbereich A zum zweiten Betriebsbereich B ist ebenfalls möglich.

Wird keine variable Ventilsteuerung verwendet, so kann der Übergang zwischen dem ersten und dem zweiten Betriebsbereich A, B durch Reduzierung der externen Abgasrückführrate EGR und gleichzeitiger Vorverlegung des Beginnes α_1 der Kraftstoffeinspritzung I durchgeführt werden, wie aus Fig. 8 ersichtlich ist. Durch die gleichzeitige Reduzierung der Abgasrückführrate EGR und Vorverlegung des Beginnes der Kraftstoffeinspritzung I können Fehlzündungen vermieden werden. Umgekehrt kann ein Übergang zwischen dem zweiten Betriebsbereich B zum ersten Betriebsbereich A durch gleichzeitige Erhöhung der internen Abgasrückführrate EGR und durch Vorverlegung des Beginnes α_1 der Einspritzung I durchgeführt werden.

- 11 -

Fig. 9 zeigt ein Messdiagramm eines Ausführungsbeispiels für den ersten Betriebsbereich A, wobei Einspritzung I , Wärmefreisetzungsrate Q , kumulierte Wärmefreisetzungsrate ΣQ und Zylinderdruck p über dem Kurbelwinkel CA aufgetragen sind. Fig. 10 zeigt ein analoges Messdiagramm für den zweiten Betriebsbereich B. Dünne und dicke Linien repräsentieren verschiedene Parameterkonfigurationen. Deutlich ist der relativ lange Zündverzug zwischen der Einspritzung I und der Verbrennung zu erkennen.

Durch das beschriebene Verfahren lässt sich sowohl im ersten, zweiten und dritten Betriebsbereich A, B, C die Brennkraftmaschine mit hohem Wirkungsgrad und niedrigen NO_x - und Rußemissionen betreiben.

PATENTANSPRÜCHE

1. Verfahren zum Betreiben einer direkteinspritzenden Diesel-Brennkraftmaschine (1), welche in einem ersten, der niedrigen bis mittleren Teillast (L_L) zugeordneten Betriebsbereich (A) so betrieben wird, dass die Verbrennung des Kraftstoffes bei einer lokalen Temperatur (T_L) unterhalb der NO_x -Bildungstemperatur (T_{NO_x}) und mit einem lokalen Luftverhältnis (λ_L) oberhalb der Rußbildungsgrenze (λ_{LS}) erfolgt, wobei die Kraftstoffeinspritzung (I) in einem Bereich zwischen 50° bis 5° Kurbelwinkel (CA) vor dem oberen Totpunkt (TDC) der Kompressionsphase begonnen wird und Abgas rückgeführt wird, wobei die Abgasrückführrate (EGR) etwa 50% bis 70% beträgt, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem zweiten, der mittleren Teillast zugeordneten Betriebsbereich (B) die Kraftstoffeinspritzung in einem Bereich zwischen etwa 2° Kurbelwinkel (CA) vor dem oberen Totpunkt (TDC) bis etwa 20° Kurbelwinkel (CA) nach dem oberen Totpunkt (TDC), vorzugsweise in einem Bereich zwischen etwa 2° Kurbelwinkel (CA) vor dem oberen Totpunkt (TDC) bis etwa 10° Kurbelwinkel (CA) nach dem oberen Totpunkt (TDC), begonnen wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass im zweiten Betriebsbereich (B) Abgas rückgeführt wird, wobei die Abgasrückführrate (EGR) etwa 20% bis 40% beträgt.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kraftstoffeinspritzung im zweiten Betriebsbereich (B) bei einem Einspritzdruck von mindestens 1000 bar erfolgt.
4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Kraftstoffeinspritzung im ersten Betriebsbereich (A) bei einem Einspritzdruck von zwischen 400 bis 1000 bar erfolgt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Verbrennungsschwerpunkt im ersten Betriebsbereich (A) in einem Kurbelwinkelbereich (CA) zwischen etwa -10° bis 10° vor dem oberen Totpunkt (TDC) liegt.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem dritten, der oberen Teillast (T_H) und der Volllast zugeordneten Betriebsbereich (C) der Beginn (α_I) der Haupteinspritzung der Kraftstoffeinspritzung (I) in einem Bereich zwischen -10° bis 10° Kurbelwinkel (CA) nach dem oberen Totpunkt (TDC) erfolgt.

- 13 -

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass im dritten Betriebsbereich (C) eine Mehrfacheinspritzung durchgeführt wird.
8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass im dritten Betriebsbereich die Abgasrückführrate maximal 30%, vorzugsweise 10 bis 20%, beträgt.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass das globale Luftverhältnis (λ) zwischen 1,0 und 2,0 beträgt.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Abgasrückführung extern und/oder intern durchgeführt wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Drallzahl (D) in zumindest einem, vorzugsweise in allen Betriebsbereichen (A, B, C) in Abhängigkeit der Last (L) und der Motordrehzahl (n) verändert wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass das effektive Kompressionsverhältnis (ε) durch Verschieben des Schließzeitpunktes (E_c) zumindest eines Einlassventiles verändert wird.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest im ersten und/oder dritten Motorbetriebsbereich (A, C) eine interne Abgasrückführung durch Öffnen des Einlassventiles während der Auslassphase und/oder durch Öffnen des Auslassventils während der Einlassphase durchgeführt wird.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Wechsel vom ersten zum zweiten Betriebsbereich (A, B) bzw. vom zweiten zum ersten Betriebsbereich (B, A) durch Reduktion bzw. Erhöhung der Abgasrückführrate eingeleitet wird.
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Übergang vom ersten zum zweiten Motorbetriebsbereich (A, B) bzw. umgekehrt durch Reduktion der internen oder externen Abgasrückführrate und durch Verzögern des Einspritzbeginnes bzw. durch Erhöhen der Abgasrückführrate (EGR) und durch Vorverlegung des Einspritzbeginnes eingeleitet wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Reduktion der erforderlichen Abgasrückführrate (EGR) beim Übergang vom ersten und zweiten Betriebsbereich (A, B) durch Verschieben des

- 14 -

Öffnungs- und/oder Schließzeitpunktes (E_o , E_c) des Einlassventiles nach spät erfolgt.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet**, dass der effektive Mitteldruck (p_{me}) im ersten Betriebsbereich (A) zwischen 0 und 6 bar, vorzugsweise zwischen 0 und 5,5 bar, beträgt.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, dass der effektive Mitteldruck (p_{me}) im zweiten Betriebsbereich (B) zwischen etwa 3,5 bis 8 bar, vorzugsweise zwischen 4 bis 7 bar, beträgt.
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, dass der effektive Mitteldruck (p_{me}) im dritten Betriebsbereich (C) mindestens 5,5 bar, vorzugsweise mindestens 6 bar, beträgt.
20. Direkteinspritzende Diesel-Brennkraftmaschine zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 19, mit einem Kraftstoffeinspritzsystem und einem Abgasrückführsystem, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Beginn (α_1) der Kraftstoffeinspritzung (I) zumindest in einem Betriebsbereich (A, B, C) zwischen 50° vor dem oberen Totpunkt (TDC) und 20° nach dem oberen Totpunkt (TDC), vorzugsweise bis 50° nach dem oberen Totpunkt (TDC) und die Abgasrückführrate (EGR) zwischen etwa 0 bis 70% variierbar ist.
21. Brennkraftmaschine nach Anspruch 20, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kraftstoffeinspritzdruck zumindest zwischen einem ersten und einem zweiten Druckniveau variierbar ist, wobei vorzugsweise das erste Druckniveau einen Bereich bis etwa 1000 bar und das zweite Druckniveau einen Bereich von mindestens 1000 bar abdeckt.
22. Brennkraftmaschine nach Anspruch 20 oder 21, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Einrichtung zur Veränderung des Drallniveaus vorgesehen ist.
23. Brennkraftmaschine nach einem der Ansprüche 20 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Einrichtung zur Veränderung des Öffnungs- und/oder Schließzeitpunktes (E_o , E_c) des zumindest einen Einlassventiles vorgesehen ist.
24. Verfahren nach einem der Ansprüche 20 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, dass mittels einer Phasenschiebereinrichtung die Steuerzeiten des Einlassventiles und/oder des Auslassventils verschiebbar sind.
25. Brennkraftmaschine nach Anspruch 24, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Einlassventil in der Auslassphase aktivierbar ist.

- 15 -

26. Brennkraftmaschine nach Anspruch 24 oder 25, **dadurch gekennzeichnet**,
dass zumindest ein Auslassventil in der Einlassphase aktivierbar ist.

fr

- 16 -

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer direkteinspritzenden Diesel-Brennkraftmaschine (1), welche in einem ersten, der niedrigen bis mittleren Teillast (L_L) zugeordneten Betriebsbereich (A) so betrieben wird, dass die Verbrennung des Kraftstoffes bei einer lokalen Temperatur (T_L) unterhalb der NO_x -Bildungstemperatur (T_{NO_x}) und mit einem lokalen Luftverhältnis (λ_L) oberhalb der Rußbildungsgrenze (λ_{LS}) erfolgt, wobei die Kraftstoffeinspritzung (I) in einem Bereich zwischen 50° bis 5° Kurbelwinkel (CA) vor dem oberen Totpunkt (TDC) der Kompressionsphase begonnen wird und Abgas rückgeführt wird, wobei die Abgasrückführrate (EGR) etwa 50% bis 70% beträgt. Um in jedem Betriebsbereich (A, B, C) einen hohen Wirkungsgrad bei niedrigen NO_x - und Rußemissionen zu ermöglichen, ist vorgesehen, dass in einem zweiten, der mittleren Teillast zugeordneten Betriebsbereich (B) die Kraftstoffeinspritzung in einem Bereich zwischen etwa 2° Kurbelwinkel (CA) vor dem oberen Totpunkt (TDC) bis etwa 20° Kurbelwinkel (CA) nach dem oberen Totpunkt (TDC) begonnen wird.

Fig. 1